



TITLE:

深紫外多波長発光素子の実現に向けたAlGaIn量子井戸三次元微細構造制御に関する研究(Abstract_要旨)

AUTHOR(S):

片岡, 研

CITATION:

片岡, 研. 深紫外多波長発光素子の実現に向けたAlGaIn量子井戸三次元微細構造制御に関する研究. 京都大学, 2017, 博士(工学)

ISSUE DATE:

2017-05-23

URL:

<https://doi.org/10.14989/doctor.k20576>

RIGHT:

学位規則第9条第2項により要約公開; 許諾条件により本文は2020-09-01に公開; 許諾条件により要約は2018-03-01に公開

京都大学	博 士 (工 学)	氏名	片岡 研
論文題目	深紫外多波長発光素子の実現に向けた AlGaIn 量子井戸三次元微細構造制御に関する研究		
(論文内容の要旨)			
<p>本論文は、深紫外域において多波長で発光する光素子の開発を目指して、AlGaIn 量子井戸の三次元構造の成長を行い多波長発光の実証と発光ダイオード (LED) の試作に成功している．また、さらなる多波長化制御と発光効率の向上を目指し、新たな微細構造の設計と作製を行っており、全 6 章からなっている．</p>			
<p>第 1 章は序論であり、本論文の背景と目的、そして本論文の構成について述べている．SiO₂などをマスク材料として用いる結晶再成長により GaN の三次元構造が作製できることが知られている．この GaN 三次元構造上に InGaIn 量子井戸を形成すれば、三次元構造を構成するファセット結晶面に依存して井戸幅や組成が変化するため、白色を含む可視多波長 LED を実現することができる．一方、この構造を AlN 系紫外材料に適用することは、原理的には可能であるが、実際的には、AlN の結晶再成長が困難であることから、これまでに紫外域での多波長発光の報告はなかった．応用上は、例えば樹脂硬化の際、異なる波長の紫外光により樹脂表面と内部を同時に硬化することが行われている．この目的を達成するための光源として、現時点では、Hg ランプの複数の輝線が用いられている．しかしながら、Hg 使用の抑制が求められる社会的情勢から、半導体による深紫外域での多波長発光への期待が高まっている．そこで本研究では、AlGaIn 系三次元構造を作製するための方法を確認しそこからの深紫外域での多波長発光を実証すること、さらに深紫外多波長 LED を試作しその特性を評価することを目指している．</p>			
<p>第 2 章では、AlN の三次元構造を作製するために、各種の加工基板上への成長に取り組んでいる．基板加工は反応性イオンエッチング (RIE) により、AlN の成長は有機金属気相エピタキシー (MOVPE) によって行っている．まず、溝加工したサファイア基板上への AlN の成長を試みたが、溝の形成方向によらず溝端部において AlN の多結晶成長が生じるため、高品質な三次元ファセット構造の作製には適さないことが分かった．そこで、サファイア基板上にエピタキシャル成長した AlN を溝加工し、その上への再成長を行う手法に取り組んだ．その結果、上記構造において AlN を$[1\bar{1}00]$方向ストライプ状に溝加工しその上へ AlN を再成長すると、凸部から横方向成長が進行し、加工構造を埋めて表面が平坦な二次元構造となることが分かった．一方、AlN を$[11\bar{2}0]$方向にストライプ状に溝加工しその上へ AlN を再成長すれば、(0001) 極性面と$(1\bar{1}01)$半極性面で構成された三次元 AlN 構造が形成できることを実証している．</p>			

京都大学	博 士 (工 学)	氏名	片岡 研
<p>第3章では、第2章で実現した三次元 AlN ストライプ構造上に AlGaIn 量子井戸を MOVPE 成長することに成功している。また、透過型電子顕微鏡 (TEM) やエネルギー分散型 X 線分光 (EDS) によって上記構造の微細観察を行い、溝端部にバンチングしたステップ構造が形成され、局所的な Al 組成の低下と井戸幅の増加が生じていることを見出している。さらに、三次元 AlGaIn 量子井戸構造のカソードルミネッセンス (CL) 測定を行い、220nm~330nm 域の深紫外域において多波長発光を観測している。この多波長化は、上記のステップ構造部における局所的な発光の長波長化によって生じていることが CL マッピングにより明らかにされている。</p> <p>第4章では、三次元 AlGaIn 系 LED の作製と評価を行っている。まず、三次元 AlN ストライプ構造上へ Si ドープ n 形 AlGaIn 層を成長する際に、膜厚や原料供給の V/III 比の上昇によってバンチングしたステップが消失する傾向にあるため成長条件の最適化を行っている。つぎに、三次元 AlN ストライプ構造上へ n 形 AlGaIn/AlGaIn 多重量子井戸/p 型 GaN を成長し、Ti/Al n 電極、Ni/Au p 電極を形成することで三次元 LED 構造の試作に成功している。また、この構造への電流注入を行い、250nm 帯と 270nm 帯の二つの発光ピークからなる多波長発光を初めて実現している。さらに、この三次元 LED 構造の電流電圧特性を測定し、二次元 LED 構造(従来の LED 構造)の特性を比較しており、直流抵抗の増大と逆方向リーク電流の増大を観測している。前者は凸部の幾何学的形状(薄膜化と長電流経路化)から n 形 AlGaIn 層が高抵抗化であること、後者は三次元構造上への p-GaN 層が一部未形成であることが原因であると究明し、今後のデバイスの特性改善への指針を得ている。</p> <p>第5章では、さらなる多波長発光のスペクトル制御と発光効率の向上を目指して三次元微細構造の探索を行っている。具体的には、バンチドステップ領域を積極的に活用すべきとの指針から、$[11\bar{2}0]$の等価な二方向で囲まれた周期的な菱形構造に着目し、菱形部が凸部あるいは凹部となる三次元 AlN 加工構造を作製し、種々の周期パターン構造へ AlGaIn 量子井戸構を再成長し CL マッピングによる評価を行っている。その結果、菱形凸部構造において、溝状凹部に形成されたバンチドステップ部からのダブルピーク発光(ステップ高さの異なる二種類のバンチドステップの形成による)と(0001)平坦部の発光からなるシングルピーク発光を観察し、三つのピーク波長から形成される発光実現により波長域拡大に成功している。</p> <p>第6章では、本研究の総括と、今後の課題についてまとめている。すなわち、三次元構造を現状のミクロンオーダーからナノオーダーに微細化することによる発光波長の制御性の向上への期待、半極性ファセットからの高効率発光への期待とともに、三次元 LED の電気特性改善に向けた指針についても述べている。</p>			

(論文審査の結果の要旨)

本論文は、有機金属気相エピタキシー (MOVPE) によってサファイア基板上に AlN 三次元ストライプ構造を作製し、これをテンプレートとして AlGaIn 量子井戸の三次元構造の成長を行い、深紫外域での多波長発光を実現し発光ダイオード (LED) の試作に成功している。また、多波長化制御と発光効率の向上を目指し、新たな微細構造の設計と作製を行っている。これらの成果は、新しい深紫外固体発光素子の開発に繋がるものである。得られた成果は、以下の内容に纏められる。

1. サファイア基板上 AlN の三次元構造の作製

- ・溝加工したサファイア基板上への AlN の再成長を検討
- ・サファイア基板上にエピタキシャル成長した AlN を溝加工し再成長を検討
- ・上記構造において $[11\bar{2}0]$ 方向にストライプ状に溝加工し、その上への AlN の再成長によって (0001) 極性面と $(1\bar{1}01)$ 半極性面で構成された三次元 AlN 構造が形成できることを実証

2. 三次元 AlN 構造上 AlGaIn 量子井戸の発光特性

- ・三次元 AlN ストライプ構造上に AlGaIn 量子井戸三次元構造の作製に成功
- ・上記構造の微細観察によって、溝端部にバンチングしたステップ構造が形成され、局所的な Al 組成の低下と井戸幅の増加が生じていることを発見
- ・その結果、局所的な発光の長波長化によって、三次元 AlGaIn 量子井戸構造からの多波長発光を実現

3. 三次元 AlGaIn 構造上 LED の作製と評価

- ・三次元 AlN 構造上に三次元 AlGaIn エピタキシャル層を作製
- ・上記構造上に n-AlGaIn/AlGaIn 多重量子井戸/p-GaIn を成長し、Ti/Al n 電極、Ni/Au p 電極を形成することで三次元 LED 構造を試作
- ・上記構造からの深紫外多波長発光 (250nm 帯と 270nm 帯) に成功

4. 微細構造による波長制御と発光効率の向上の検討

- ・菱形凸部および菱形凹部微細構造を作製し多波長発光を評価
- ・菱形凸部構造において、バンチドステップ部からのダブルピーク発光と (0001) 平坦部の発光からなるシングルピーク発光を観察し、多波長発光の波長域拡大に成功

本論文は、加工 AlN テンプレート上への AlGaIn 量子井戸の三次元構造成長を実現し、深紫外域での多波長発光 LED の試作に成功している。また、新たな微細構造の設計と作製を行っており、新しい深紫外発光素子の応用だけでなく、結晶学上においても寄与するところが少なくない。よって、本論文は博士 (工学) の学位論文として価値あるものと認める。また、平成 29 年 2 月 22 日、論文内容とそれに関連した事項について試問を行って、申請者が博士後期課程学位取得基準を満たしていることを確認し、合格と認めた。

なお、本論文は、京都大学学位規定第 14 条第 2 項に該当するものと判断し、公表に際しては、当該論文の全文に代えてその内容を要約したものとすることを認める。

